



**Estructura y relaciones tectónica-sedimentación en el
contacto del Paleozoico de Villafeliche-Calamocha y
la cuenca neógena de Calatayud**

María Belén Corral González



**Departamento de
Ciencias de la Tierra
Universidad Zaragoza**

DIRECTOR:
Carlos Luis Liesa Carrera

AGRADECIMIENTOS

A Carlos Luis Liesa le agradezco mucho más de lo que se pueda decir con palabras y a Miguel Angel Marazuela. A ambos les agradezco su paciencia y comprensión.

RESUMEN

Este trabajo presenta el estudio sobre la estructura y las relaciones entre la tectónica y la sedimentación en el margen occidental de la cuenca neógena de Calatayud. Dicho margen está caracterizado por una estructura compleja compuesta por dos cabalgamientos y un sistema más desarrollado de fallas normales, todas ellas con direcciones NW-SE a NNW-SSE y buzamientos hacia el oeste. El estudio de campo y las relaciones de corte entre dichas estructuras ha permitido distinguir dos etapas principales en la evolución de esta región. Una primera etapa, en régimen compresivo, que dio lugar a los cabalgamientos que ponen los materiales cuarcíticos paleozoicos sobre los materiales detríticos del neógeno inferior de la cuenca de Calatayud, a la vez que genera un relieve que alimentará al resto de las unidades del neógeno medio. Asociados a estos cabalgamientos existe una amplia zona de cizalla con un notable espesor de brechas y harina de falla, que varía a lo largo de las estructuras estudiadas, y que puede estar relacionada con sucesivas reactivaciones con direcciones de transporte distintas. El evento extensional posterior que genera las fallas normales existentes en la zona de estudio propicia además la reactivación de los cabalgamientos preexistentes (inversión negativa) y da lugar al desarrollo de la cuenca neógeno-cuaternaria del Jiloca. Estos eventos de deformación se han reconocido en dos estructuras complejas paralelas y consecutivas en el tiempo que se agrupan en la zona de la Venta de los Céntimos por un lado, y en el entorno del pueblo de Lechago por otro.

INDICE

1. Abstract	4
2. Introducción y objetivos	4
3. Situación y marco geológico	5
4. Metodología	6
5. Estratigrafía	6
6. Estructura general	11
7. Análisis de estructuras en afloramiento	13
7.1 La estructura de Lechago	13
7.1.1 El cabalgamiento de Lechago	14
7.1.2 La falla normal de Lechago	17
7.2 La estructura de la Falla de Calamocha	20
7.2.1 El cabalgamiento de Calamocha	20
7.2.2 Las fallas normales de Calamocha	22
7.3. La falla normal de Luco del Jiloca	25
7.4. La deformación del Paleozoico	25
8. Discusión	27
9. Conclusiones	29
10. Bibliografía	29

1. ABSTRACT

The present work presents the study about the structure and the tectonic-sedimentation relationships of the western margin of the Calatayud basin. That margin is characterized by a complex structure, consisting of two thrusts and a well-developed normal fault system, all of them with a NW-SE to NNW-SSE direction and dipping to the west. The field study and of the cross-relations between the structures has allowed to distinguish two main evolution stages. The first stage, with a compressional regime, gave rise to the thrusts, which overlay the Palaeozoic rocks over the lower Neogene sediments of the Calatayud basin and they generated a structural relief that sourced of sediments to the upper Neogene series. Thrusts have associated a thick shear zone with development of fault breccias and gouges, which could be related to successive reactivations of thrusts with different transport directions. The second structural stage generated the normal fault system, mainly reactivating the previous thrust planes (negative tectonic inversion). Such extensional structure gave rise to the development of the Neogene-Quaternary Jiloca basin. Such deformational events have been recognized superposed in two complex structures at Lechago and Venta de los Céntimos areas.

Key words: Thrust, normal fault, inversion tectonics, Neogene, Palaeozoic, Calamocha fault.

2. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El presente trabajo estudia la estructura tectónica y las relaciones de tectónica-sedimentación del contacto entre el macizo paleozoico de Ateca-Daroca y la cuenca neógena de Calatayud. En esta zona, dentro del sector meridional entre Villafeliche y Calamocha, se plantea la caracterización de la geometría de las estructuras que ponen en contacto estas unidades geológicas así como el avance en el conocimiento de la cinemática de las mismas, es decir, qué procesos tectónicos principales dieron lugar a su desarrollo y cómo ha ocurrido.

El objetivo principal del trabajo es proponer un modelo de evolución de la estructura. Se propone una caracterización geométrica y cinemática de las principales estructuras tectónicas de la región de estudio, a partir de la toma de datos en campo y de la realización e interpretación de cortes geológicos y, también, de la relación de las estructuras con la serie sintectónica neógeno-cuaternaria.

3. SITUACIÓN Y MARCO GEOLÓGICO

La zona de estudio se sitúa al NE de la Península Ibérica entre las localidades de Luco del Jiloca, Lechago y Calamocha pertenecientes a la comarca turolense del Jiloca (Fig. 1). Se localiza en la hoja 1:50000 número 491 (Calamocha), en el sector NE, en el margen occidental de la cuenca paleógeno-neógena de Calatayud-Montalbán (Fig. 1). Esta cuenca de origen transpresivo-compresiva se sitúa en el eje de un anticlinal complejo vergente al NE, el cual estuvo aislado del resto del sistema Ibérico durante gran parte de la era Mesozoica, razón que atribuyen algunos autores con el hecho de que apenas se conserven sedimentos de esta unidad en la zona. En este margen los materiales del zócalo varisco están en contacto con los materiales neógenos de la cuenca mediante el cabalgamiento de Daroca (Julivert, 1954; Colomer, 1987).

El registro sedimentario neógeno de esta cuenca se caracteriza por facies detríticas groseras de abanico aluvial que pasan lateralmente hacia el centro de la cuenca a carbonatos y evaporitas (Sanz-Rubio, 2003). Al SW de esta zona se encuentra la semifosa pliocuaternaria del Jiloca, una estructura asimétrica delimitada por la existencia de grandes fallas en relevo de dirección NW-SE y NNW-SSE desarrolladas en un contexto de actividad tectónica extensional neógeno-cuaternaria (Álvaro et al., 1979; Simón, 1983; Sanz-Rubio, 1999).

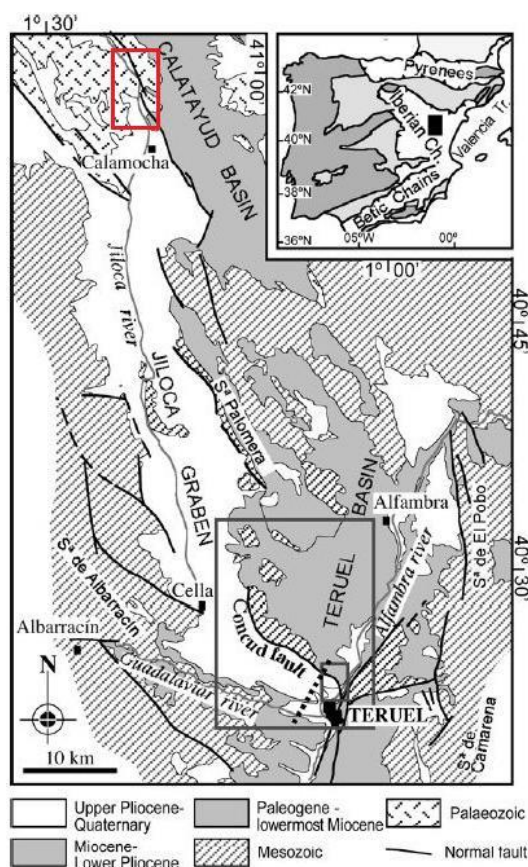


Figura 1. Localización de la zona de estudio marcada mediante un recuadro rojo. Modificado de Arlegui et al. (2006)

4. METODOLOGÍA

La metodología que se ha empleado en este trabajo incluye: (1) Recopilación bibliográfica y revisión de trabajos previos de la región de estudio; (2) Estudio de la cartografía a escala 1:50.000 del Mapa Geológico Nacional de la hoja de Calamocha (Hernandez *et al.*, 1983); (3) Reconocimiento de la estratigrafía de la región, mediante la recopilación y comparación de trabajos y el reconocimiento en campo de la misma; (4) Realización de una cartografía geológica de detalle a escala 1:25000 a partir de la fotografía aérea, la ortoimagen a escala 1:5.000, obtenidas del Servicio de Investigación Territorial del Gobierno de Aragón (SITAR), y trabajo de campo; (5) Toma de datos estructurales sobre la geometría y cinemática de fallas y cabalgamientos, como la orientación de sus planos y estrías y las características de las estructuras asociadas a los mismos como estructuras S-C y pliegues asociados. En esta etapa se han realizado esquemas y cortes en el campo y se han tomado fotografías, panorámicas y de detalle, para su posterior estudio; (6) Trabajos de gabinete en los que se han representado los datos de orientación de las estructuras en proyección estereográfica con el programa informático Stereonet 8.9.2 (Allmendinger, 2011-2013) e interpretación de los resultados. También se ha llevado a cabo el estudio de los cortes, fotos y esquemas realizado en el campo y la representación de los resultados en mapas y figuras (Adobe Illustrator CS3), y (7) Análisis de las relaciones entre las principales estructuras tectónicas y el relleno neógeno cuaternario, discusión con los resultados previos, propuesta de evolución de la estructura y redacción de la memoria (Word 2007).

5. ESTRATIGRAFÍA

La descripción de las unidades sedimentarias diferenciadas en esta zona se realiza mediante la organización en unidades más o menos homogéneas en función de su litología. Estas unidades que hemos establecido posteriormente serán correlacionadas con las propuestas por otros autores para la misma zona.

La serie sedimentaria incluye una potente serie paleozoica, dentro de la cual no hemos diferenciado unidades ya que en el campo no ha sido posible establecer de una manera clara los límites entre las mismas, y además, esto queda fuera de los objetivos de este trabajo. Discordantemente sobre la serie paleozoica se sitúan los materiales cenozoicos. En esta zona no aparece representado el Mesozoico. De hecho la existencia o no de cobertura mesozoica bajo el relleno terciario de la Cuenca de Calatayud es uno de los grandes interrogantes de la zona.

5.1. Unidades

5.1.5. Paleozoico

En esta zona el Paleozoico se encuentra representado por cuarcitas del Cámbrico medio y superior. Aparece en afloramientos dispersos íntimamente ligados a los cabalgamientos estudiados. Se presenta bien estratificado en algunos tramos y más masivo en otros, pero en todos los casos con orientaciones más o menos constantes, de las capas en torno a 140, 25 W.

5.1.2. Cenozoico

El Cenozoico se apoya sobre el Paleozoico mediante un contacto discordante. En muchas ocasiones las unidades inferiores de esta unidad forman algunos niveles de paleosuelos. El Neógeno inferior y medio en esta zona está representado por una serie detríticas, carbonática y evaporítica, cuyos sedimentos se depositaron en un régimen continental, en ambientes palustres, lacustres y zonas más o menos proximales de abanicos aluviales. Se han diferenciado 11 unidades (N1 a N11), que afloran fundamentalmente en la zona E de nuestra área de estudio, afloramientos de Lechago (Fig. 2) y en el afloramiento de La Venta de los Céntimos asociado a la fosa del Jiloca (Fig. 3).

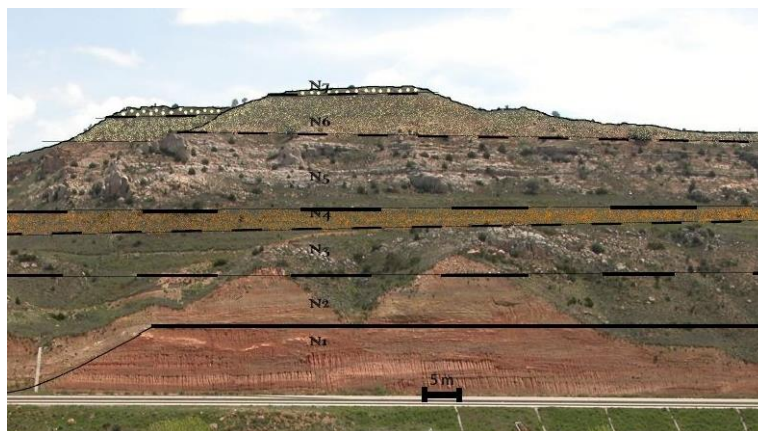


Figura 2. Aspecto de campo de las unidades N1 a N7 en la zona de afloramientos de las Muelas de Lechago.

Unidad N1: Esta unidad está constituida por la alternancia de limolitas de color rojo con conglomerados de cantos silíceos subredondeados procedentes del Cámbrico de la zona. Puede alcanzar los 200 m de espesor (Martín-Bello, 2013). En algunos tramos presenta una base erosiva, con formaciones de paleosuelos. Pasa lateralmente a las unidades N2 a N7.

Unidad N2: Constituida por litologías arcillo-lutíticas pardorrojizas y blancas, esta unidad consta de materiales sedimentados en un ambiente palustre-lacustre y zonas medias de abanicos aluviales.

Unidad N3: Esta unidad está formada por cuerpos tabulares calcáreos, que pasan lateralmente hacia el NE a materiales arcillosos.

Unidad N4: Constituida por lutitas pardorrojizas y blancas, esta unidad presenta unas características muy similares a N2.

Unidad N5: Esta unidad está constituida por calizas micríticas masivas con textura fenestral y calizas intramicríticas organizadas en cuerpos tabulares con zonas de morfologías canaliformes.

Unidad N6: Arcillas y lutitas de color blanquecino con algunos canales carbonatados.

Unidad N7: Calizas nodulosas blancas y amarillentas con intercalación de cuerpos conglomeráticos y lutíticos de hasta 1m de potencia y geometría canaliforme (Pérez, 1989). Presenta en algunos tramos zonas oquerosas y bioturbación por raíces.

Unidad N8 (Rojo 2): Esta unidad está constituida por limolitas y margas de colores amarillos a rojos. Aflora junto a la carretera de Calamocha-Luco, en el afloramiento de La Venta de Los céntimos. En esta zona no está representado el contacto entre esta unidad y los materiales miocenos más antiguos. Es posible que existan materiales intermedios o que esté relacionada de algún modo con la unidad N1, pero no se ha podido comprobar tal cosa en el campo. Esta unidad se atribuye a zonas proximales y medias de abanicos aluviales procedentes del E y SE (Hernández et al., 1983; Martín-Bello, 2013).

Unidad N9 (Calizas del Páramo): Calizas y calizas margosas con intercalaciones de margas y arcillas que afloran, al igual que la unidad anterior en la zona de La Venta de los Céntimos. Se atribuye a un medio sedimentario lacustre que tiende a palustre hacia el techo (Hernández et al., 1983; Martín-Bello, 2013).

Unidad N10 (Rojo 3): Esta unidad está constituida por limolitas y arcillas rojas. Presentan intercalaciones arenosas y niveles conglomeráticos de hasta 1m de potencia. Las facies más groseras han sido interpretadas como depósitos de canales, mientras que los finos representan los materiales de las llanuras de inundación. En conjunto se atribuyen a zonas medias y distales de abanicos aluviales (Hernández et al., 1983; Martín-Bello, 2013).

Unidad N11: Con potencias muy variables que van de 2 a 10 metros, esta unidad que está modelada en glacis está constituida por gravas cuyos cantos van de redondeados a subredondeados de cuarcita y cuarzo con matriz arenosa.

5.1.3. Cuaternario

Los materiales pertenecientes al cuaternario son conglomerados y brechas sueltas con matriz arcillo-limosa, que en muchos casos forman abanicos al pie de las sierras, constituidos principalmente por cantos silíceos procedentes de los relieves paleozoicos y

cantos calcáreos de color pardo procedentes de materiales miocenos (Martín-Bello, 2013). Estos materiales se encuentran a su vez en el fondo de numerosos barrancos así como en los márgenes de los ríos que surcan la zona en forma de pequeños niveles de terraza.



Figura 3. Foto general de las unidades N8 a N11 en los afloramientos del entorno de Venta de los Céntimos.

5.2. Correlación con otros trabajos

Para este apartado se ha confeccionado una correlación de nuestras unidades con las unidades de cada trabajo consultado y sus edades respectivas, lo cual queda reflejada en la figura 4. En este trabajo no se han distinguido unidades dentro del Paleozoico ni del Cuaternario, por lo que hemos obviado estas unidades en la correlación.

Por otro lado, la descripción se centra principalmente en las unidades miocenas, ya que son las que presentan diferencias más significativas en función de la zona de estudio y del trabajo en cuestión. A continuación describimos brevemente las unidades tomadas por otros autores y su correlación con las nuestras.

En el mapa geológico nacional de Calamocha (Hernández et al., 1983) se describen 10 unidades para el intervalo considerado (unidades 32 a 41). Los materiales lutíticos y arcillosos están englobados en la unidad 32 y los calcáreos en la unidad 35. Tanto en este como en los otros trabajos consultados, las unidades posteriores de edad Mioceno Superior-Plioceno, coinciden a grandes rasgos con las unidades de este trabajo.

Las unidades establecidas por Colomer (1987) abarcan una zona de estudio situada hacia el centro de la cuenca. Este autor engloba los materiales terrígenos en una única unidad, Ng 4, mientras que distingue diferentes unidades lacustres con abundancia de yesos y lutitas.

El trabajo realizado por Pérez (1989) en las cubetas de Muniesa y Montalbán diferencia unidades sedimentarias limitadas por discontinuidades relacionadas con la tectónica (UTS). Las UTS T4, T5 y T6 abarcan el Mioceno inferior y medio. Las unidades T5 y T6 forman dos secuencias de signo positivo, es decir, dos secuencias sedimentarias en las que la actividad

tectónica es decreciente, separadas por una ruptura de tipo 3, lo que significa que tuvo lugar entre ellas un crecimiento instantáneo de la actividad tectónica o diastrófica. Esta ruptura se relaciona en nuestro trabajo con el contacto entre las unidades N5 y N6.

Recientemente, Martín-Bello (2013) diferencia unidades en el entorno de Calamocha, muy cerca de nuestra área de trabajo, por lo que sus unidades son muy parecidas a las distinguidas en nuestro estudio. La principal diferencia estriba en que nuestra zona de estudio está más próxima al borde de la de cuenca, por lo que en nuestro caso reconocemos facies más proximales en algún caso y menores espesores en otros.

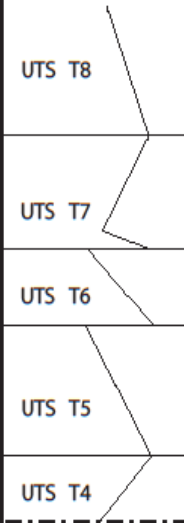
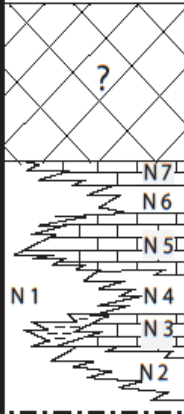
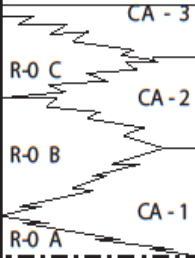
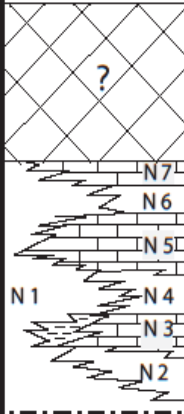
E D A D			HERNANDEZ ET AL (1983)	COLOMER (1987)	PEREZ (1989)	MARTIN -BELLO (2013)	ESTE TRABAJO					
CUATERNARIO												
NEOGENO	PLIOCENO	VILLAFRAN- QUIENSE	GLACIS	Ng 12		GLACIS	N 11					
			ROJO 3	Ng 11		ROJO 3	N 10					
		RUSCINIENSE	PARAMO 2	Ng 10		PARAMO 2	N 9					
			ROJO 2	Ng 9		ROJO 2	N 8					
	MIOCENO	SUPERIOR	TUROLIENSE	UNIDAD DETRÍTICA SUPERIOR		Ng 8						
			VALLESIEN- SE	Ng 7		UTS T7				?		
		MEDIO	ARAGONIENSE	UD. CALIZO- MARGOSA DE BAÑON		Ng 6				UTS T6	CA - 3	N 7
			SUP	UD. DETRI- TICA		Ng 5				UTS T5	CA - 2	N 6
		INF	ARAGONIENSE	SUPERIOR		Ng 4				UTS T4	R-O C	N 5
			SUPERIOR	Ng 3		UTS T3				R-O B	N 4	
		PALEOZOICO		Ng 1		UTS T2				R-O A	N 3	
				Ng 2		UTS T1					N 2	

Figura 4. Correlación de las unidades estratigráficas establecidas para la zona de estudio. Se han tenido en cuenta las unidades tomadas por los principales autores que han estudiado esta zona.

6. ESTRUCTURA GENERAL

En la figura 5 se muestra la cartografía geológica a escala 1:50000 de la zona de estudio que se ha trabajado en detalle y la orientación del corte geológico realizado en esta zona. En esta cartografía se han utilizado las unidades descritas en el apartado anterior. En verde, aparecen los materiales paleozoicos ocupando la parte NW de nuestra zona de estudio. La zona NE, en tonos amarillos y naranjas está representada por las unidades neógenas. Los materiales cuaternarios están representados en los fondos del barranco Cuencabuena y el río Pancrudo y en la zona SW, en la margen izquierda del río Jiloca, tanto en abanicos aluviales, como en terrazas.

Entre las estructuras principales cartografiadas en el mapa, destacan fallas normales con trazas más o menos rectilíneas y de dirección NW-SE a NNW-SSE. Estas fallas, que tienen su bloque hundido al oeste ponen normalmente en contacto materiales paleozoicos al este de la falla con neógenos al oeste de la misma. Este es el caso por ejemplo de la falla normal de Luco de Jiloca o la falla principal que atraviesa el río Jiloca, falla que se corresponde con la Falla de Calamocha. A partir del entorno del afloramiento de La Venta de los Céntimos y hacia el sur, la falla de Calamocha pone en contacto materiales neógenos más antiguos (unidad N1) con materiales más modernos (unidades N8-N10). Asimismo el escarpe de falla parece ser el origen de pequeños abanicos aluviales (unidad N11) que drenan hacia el centro de la Depresión del Jiloca. En este afloramiento aparecen tres trazas principales de falla, bastante paralelas entre ellas y oblicuas a un cabalgamiento de materiales paleozoicos sobre brechas, conglomerados y arcillas neógenas (unidad N1), cuya traza tiene una dirección cercana a N-S.

En el entorno de Lechago destaca un afloramiento de materiales paleozoicos encerrado entre materiales neógenos, con los cuales está en contacto a través de una falla normal al oeste, y un plano de cabalgamiento al este, estructuras que muestran una traza de orientación NNW-SSE.

Finalmente, en la zona de las Muelas de Lechago un sinclinal de orientación próxima a N-S está afectando a los materiales neógenos lutíticos y carbonatados (unidades N3 a N-7). Se trata de un sinclinal recto suave, con buzamientos de sus flancos inferiores a 10°.

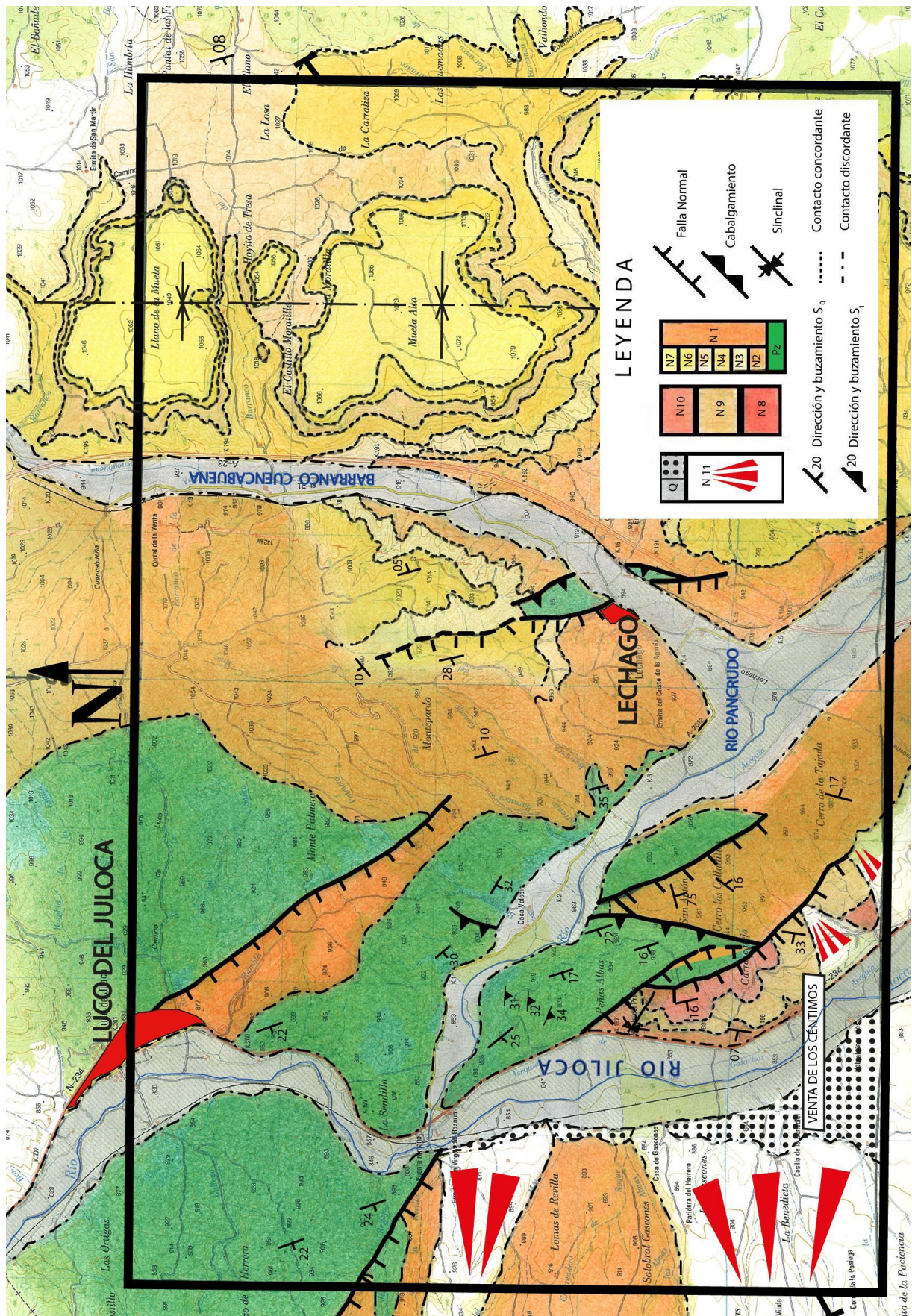


Figura 5. Cartografía geológica a escala 1:25000 de la zona de estudio. En tonos naranjas los materiales neógenos y en verde los paleozoicos.

En el corte geológico WSW-ENE de la zona de estudio (Fig. 6) se aprecia como los cabalgamientos de Lechago y Calamocha, que ponen el Paleozoico por encima de los niveles más bajos del Neógeno, están fosilizados por los niveles más altos del mismo. Estos cabalgamientos se encuentran afectados en ambos casos por fallas normales posteriores, situadas al oeste de los mismos y que bajan topográficamente el contacto entre dichas unidades. Estas fallas normales probablemente representan la reactivación en profundidad (inversión negativa) de los planos de cabalgamiento.

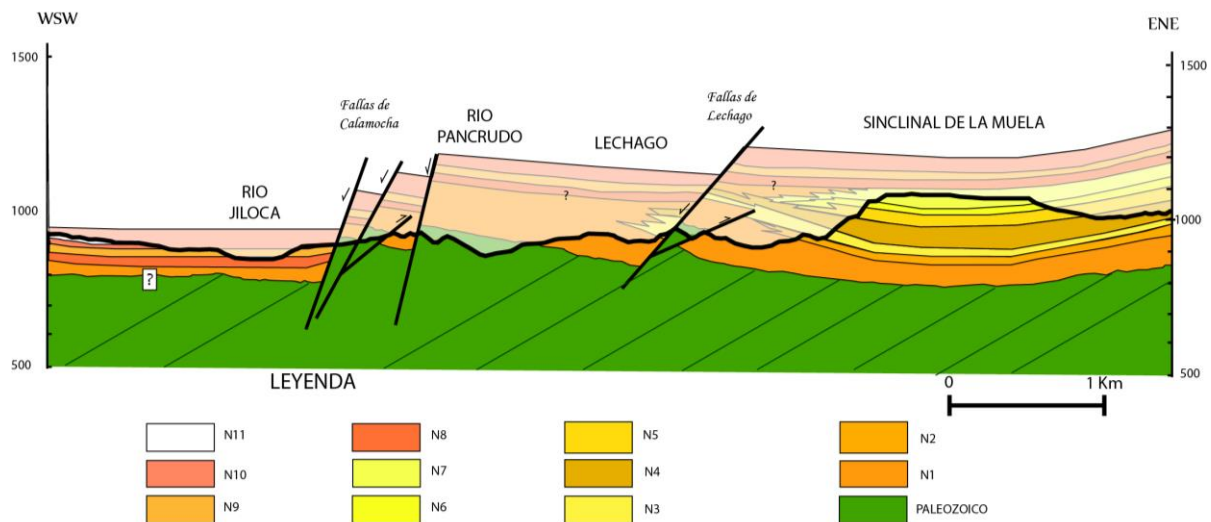


Figura 6. Corte geológico de la zona de estudio

F

7. ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS EN AFLORAMIENTO

En este apartado vamos a describir en detalle y a analizar las estructuras (fundamentalmente cabalgamientos y fallas normales) que aparecen en los afloramientos de Lechago y Calamocha. Además describiremos otras estructuras como la falla normal de Luco de Jiloca y haremos algunas observaciones sobre la deformación que afecta a los materiales paleozoicos de la región.

7.1 La estructura de Lechago

La estructura de Lechago es una estructura compuesta por una asociación de una falla normal y un cabalgamiento que ponen materiales paleozoicos entre materiales neógenos (Fig. 7). Ambas estructuras presentan direcciones similares, y su traza se puede decir que es paralela. Si lo miramos más en detalle, podemos observar como las unidades que cortan o fosilizan al cabalgamiento aparecen en una posición topográfica más baja, debido a la acción de la falla normal (Fig. 8).

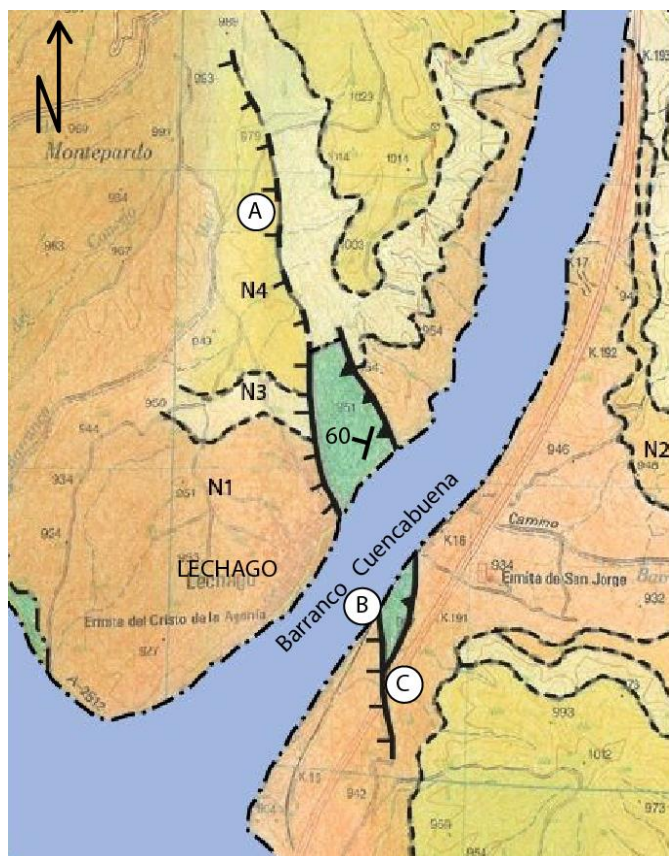


Figura 7. Fragmento de la cartografía de la zona en la que destacan las estructuras de Lechago, principalmente el cabalgamiento que levanta los materiales paleozoicos, en verde, y las fallas normales que bajan los materiales neógenos, en naranja. En azul aparecen cartografiados los materiales cuaternarios pertenecientes a la riera del barranco Cuencabuena.



Figura 8. Panorámica del pueblo de Lechago en la que se aprecia la posición de las principales estructuras de la zona. De este a oeste tenemos los materiales neógenos fosilizando el cabalgamiento que pone en superficie los materiales paleozoicos afectados por la falla normal de Lechago. En esta imagen tenemos marcada la posición del afloramiento del cabalgamiento.

7.1.1 El cabalgamiento de Lechago

En esta zona hemos encontrado dos planos principales de cabalgamiento (Fig. 9). Estos planos, paralelos entre sí, aparecen fosilizados por la unidad N3. El plano inferior (Fig. 10) separa la unidad N1 de los materiales paleozoicos, mediante un plano neto a grandes rasgos con una dirección en torno a N-S (de N175°E a N005°E) y un buzamiento de 25-32° al W, muy similar a la estratificación paleozoica (150, 32° W). Este plano genera una zona

de trituración de unos 20 cm de anchura, en la que se mezclan cantos paleozoicos con una matriz neógena. Por debajo de este plano, tenemos estratos de la unidad N1 buzando suavemente (10°) al este. En la zona de deformación se reconoció un plano menor orientado $005\ 42\ W$ con una familia de estrías de movimiento inverso y un cabeceo de $58^\circ\ S$. Esta estructura indica una dirección de transporte del bloque superior del cabalgamiento hacia el NE a ENE (Fig. 10).

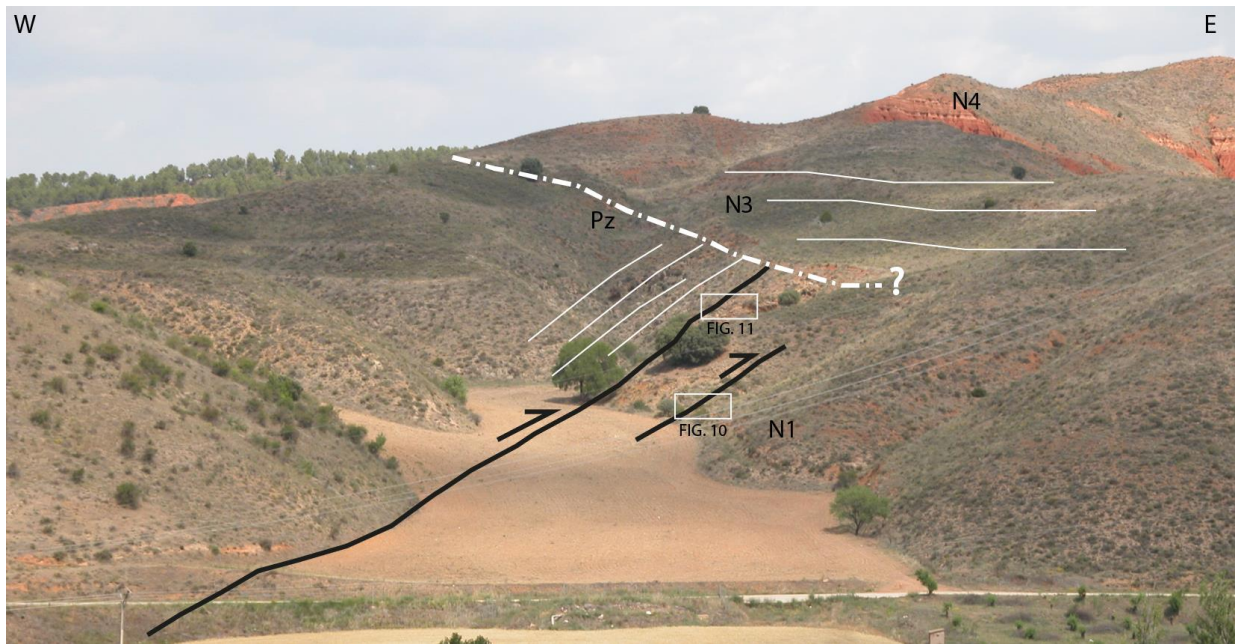


Figura 9. Afloramiento principal del cabalgamiento de Lechago. Se describen dos estructuras principales asociadas, el plano de cabalgamiento inferior, figura 10, y el superior figura 11.

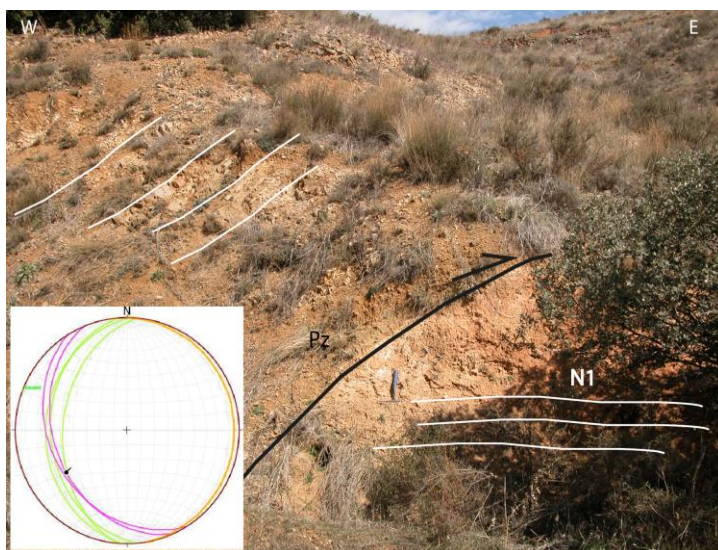


Figura 10. Plano inferior del Cabalgamiento de Lechago en el que se aprecia la naturaleza neta del plano que separa dos litologías muy diferentes como son el N1 y el Paleozoico de la zona. En el margen inferior izquierdo aparece la representación de los principales planos medidos en el afloramiento. En verde los planos de falla inversa, uno de ellos con estría, en rosa S_0 de las capas paleozoicas y en naranja S_0 de las capas neógenas.

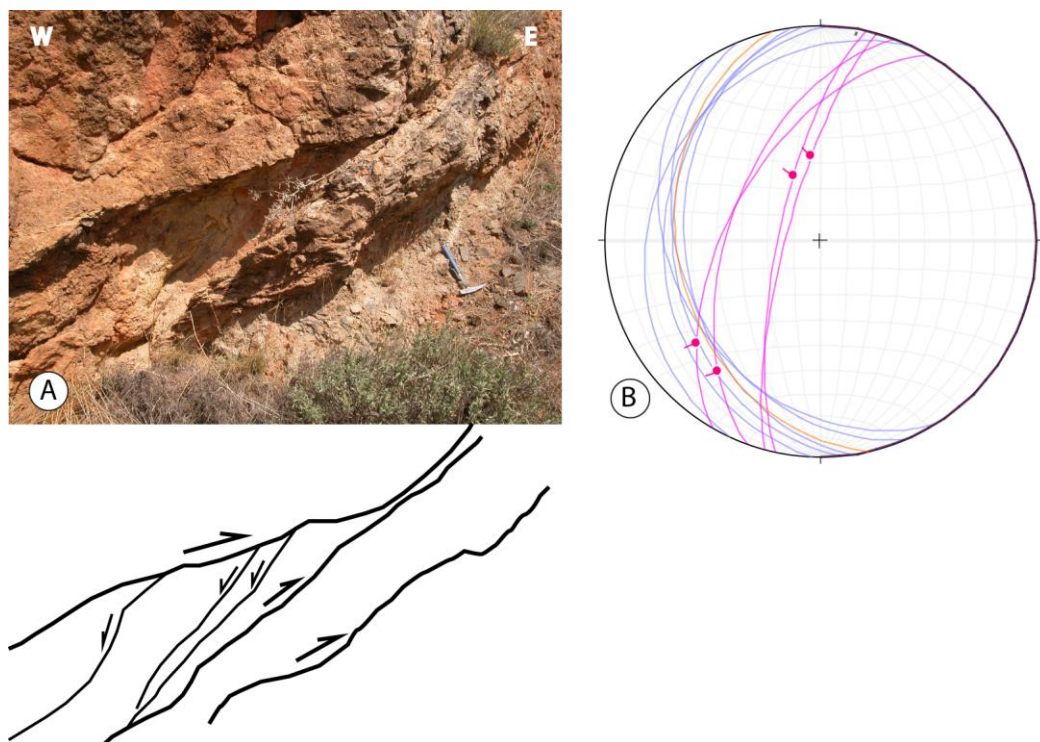


Figura 11. A. Plano superior del Cabalgamiento de Lechago en el que se aprecian algunas diferencias con el plano inferior, fig. 10. Este plano implica una amplia zona de cizalla en la que se aprecian fallas normales. **B.** Representación de los principales planos del afloramiento. En rosa, las fallas normales menores, con sus respectivas estrías. En azul los planos de cabalgamiento y en naranja los planos de S_0 del Paleozoico.

El plano de cabalgamiento superior con una dirección $N175^\circ E$ y un buzamiento de 28° al oeste, tiene asociado una zona de falla con brechificación con un espesor de 50 cm a 1 m. En ella se han reconocido diferentes planos menores de cabalgamiento, todos de dirección similar al principal (Fig. 11B) y también con una orientación paralela al paleozoico del bloque superior. Lamentablemente no se pudo reconocer ninguna estría sobre dichos planos. Esta zona se compone de materiales paleozoicos brechificados, reorganizados en torno a los planos de cabalgamiento y cementados. Por encima de esta zona de falla, nos encontramos al paleozoico bien estratificado, $167,34^\circ W$ y fosilizado por un Neógeno buzando ligeramente al E. Dentro de la zona de falla, apenas se diferencian las brechas, presentando una superficie medianamente homogénea. Debajo de los principales planos de cabalgamiento se reconocen brechas angulosas de tamaños que no superan los 30 cm de diámetro.

Asociadas a este cabalgamiento se han reconocido una serie de fallas normales, de salto en torno a 1 m, que cortan los planos de cabalgamiento, pero dentro de la zona de falla. Estas fallas normales, con orientación $030,55^\circ W$, presentan estrías que indican movimientos normales de las mismas, pero con componentes tanto dextral (cabeceo $55^\circ N$) como sinistral (cabeceo $30^\circ S$), y que indican una dirección de transporte hacia el NW o SW, respectivamente.

7.1.2 La falla normal de Lechago

La estructura asociada a la falla normal en esta zona es una estructura sencilla que se reconoce en diferentes puntos. En la figura 12 se muestra la traza de la misma en torno a la localidad de Lechago con dirección principal 160,56 W, pero además puede seguirse la misma traza hacia el sur, aflorando en los taludes de la autovía y la vía del tren. Como podemos observar la falla baja topográficamente el contacto entre el paleozoico y las diferentes unidades neógenas con un salto estimado de unos 200 m (Fig. 6).

En el afloramiento de esta falla normal al norte de Lechago (A en la Fig. 7) se observa un pequeño pliegue de acomodación en los materiales neógenos (Fig. 13A). Se trata de un pliegue muy amplio con buzamientos en torno a los 10-15° a un lado y al otro de la charnela. En esta zona no existe un plano principal de falla, si no que aparecen numerosos planos con saltos menores, que en conjunto asumen el salto de la falla principal (Fig. 13B, C). Se trata de pequeños planos de dirección NNW-SSE a N-S con buzamientos elevados al oeste (Fig. 13D), en los que el salto mayor que hemos medido no supera el metro de altura y el salto mínimo se queda en torno a los 15 cm. En torno a los planos de las fallas se observan cantos orientados y acomodados al movimiento de las fallas. En esta zona el buzamiento de las capas neógenas varía entre 2° y 15°, principalmente hacia el W, salvo en torno al pliegue de acomodación, en el que encontramos buzamientos contrarios.

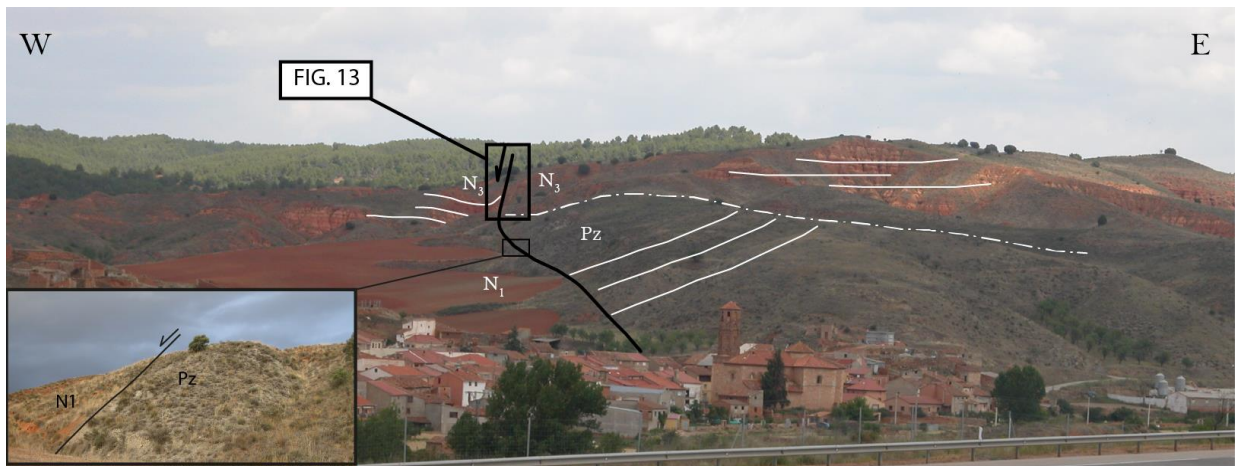


Figura 12. Panorámica de la falla normal de Lechago en la que se aprecia un pequeño pliegue de arrastre en los materiales neógenos, Fig. 13, así como la disposición de los materiales en torno a la misma.

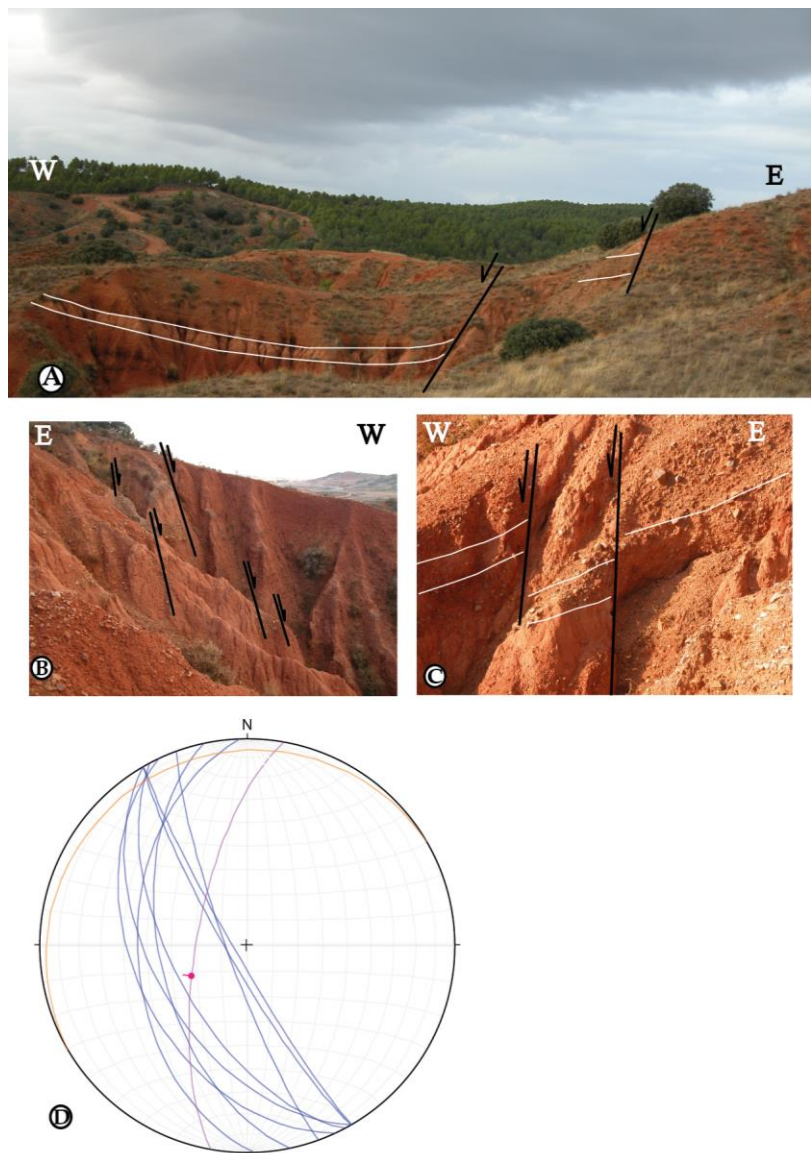


Figura 13. A. Afloramiento superior de la falla normal de Lechago con el detalle del pliegue de arrastre en el Neógeno. B y C. Detalle de los planos de fallas normales menores en los que se desdobra el plano principal. En ellos se aprecian menores saltos, que en conjunto acomodan el grueso de la deformación principal. D. Representación estereográfica de los planos de falla normal, en azul, la estratificación del neógeno en naranja y un plano de falla normal con estría en morado.

En el afloramiento de la vía del tren (B en Fig. 7) encontramos un único plano, neto y rectilíneo que separa los materiales paleozoicos de los neógenos (unidad N1) y que está fosilizado por una terraza del barranco de Cuencabuena (Fig. 14A). Este plano con buzamiento al oeste tiene asociada una zona de brechificación en los materiales paleozoicos más cercanos al plano de cabalgamiento, de unos 2 metros de ancho (Fig. 14B). Las brechas paleozoicas se acomodan formando planos paralelos a la falla normal. Se han tomado diferentes datos del plano, así como de la estratificación de las brechas paleozoicas, que muestran una dirección NNW-SSE, similar a la traza cartográfica de la falla, y buzamientos en torno a 60° hacia el oeste (Fig. 14C). No se han encontrado estrías y no se ha podido medir orientaciones en el Neógeno debido a la naturaleza masiva del mismo.

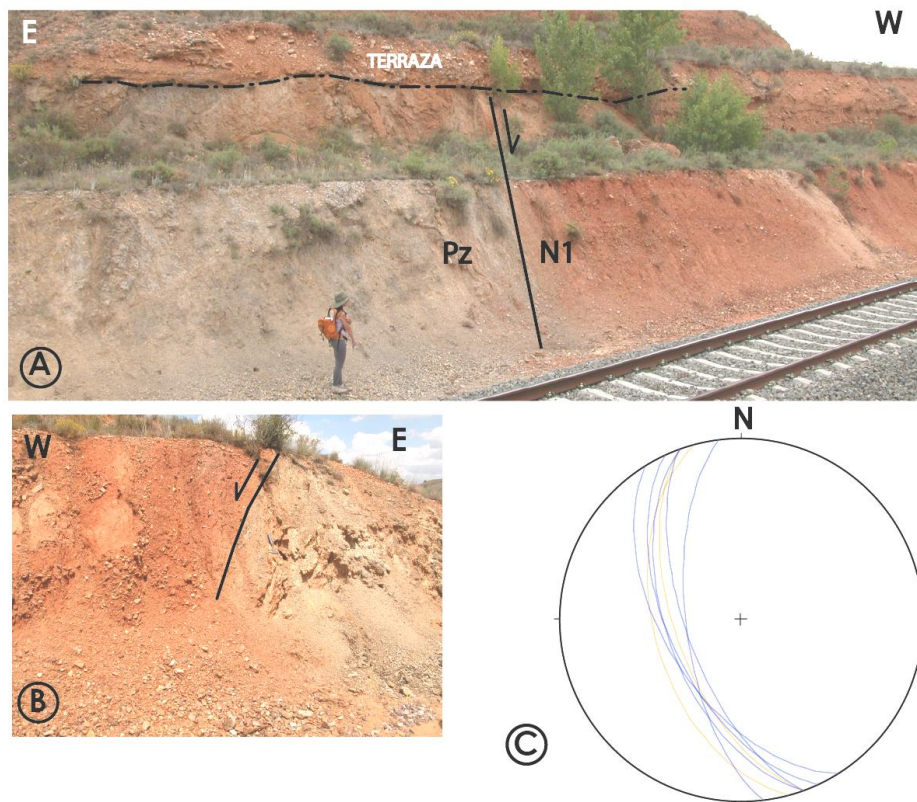


Figura 14. **A.** Afloramiento de la falla normal en las vías del tren en el talud norte, y, **(B)** en el talud sur, **C.** Representación estéreo-gráfica de las medidas del plano de falla (azul) y la estratificación en naranja.

En el talud de la autovía Mudéjar, en el cual desgraciadamente no se pudieron tomar datos, se reconoce la falla normal principal que pone en contacto el Paleozoico al este con el Neógeno (probablemente parte alta de N1) al oeste (Fig. 15). Además el talud de la autovía permite reconocer dos fallas menores antitéticas que desplazan unos 40-50 cm las capas neógenas, las cuales muestran un ligero basculamiento (15-20°) al oeste., se observan fallas conjugadas. Se trata de planos muy netos, sin brechificación ni deformación asociada.



Figura 15. Afloramiento de la falla normal en el talud sur de la autovía en la que se aprecian las fallas antitéticas asociadas a la misma.

7.2 La estructura de la Falla de Calamocha

La zona de la falla de Calamocha presenta una estructura más compleja (Fig. 16) caracterizada por una serie de fallas normales y cabalgamientos que se cruzan y se cortan entre sí. En la figura aparecen localizadas las diferentes estaciones de tomas de datos, E1 a E3 corresponden a observaciones sobre el cabalgamiento de Calamocha, y de A a C las observaciones sobre las fallas normales.

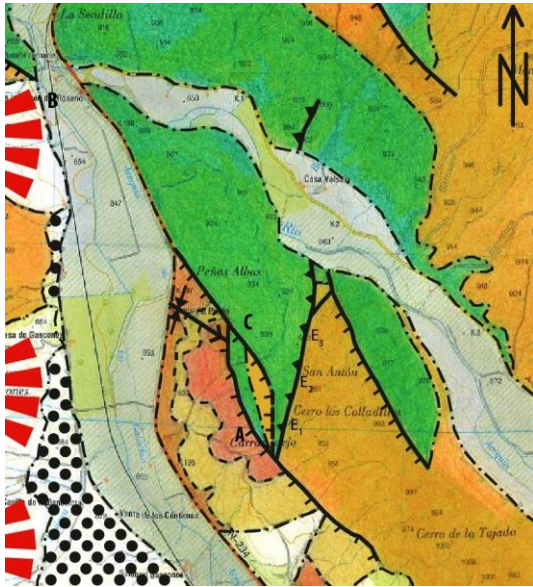


Figura 16. Fragmento de la cartografía geológica de la zona de la Falla de Calamocha. Aquí se aprecian las trazas de las principales estructuras así como la localización de las estaciones de medida, tanto del cabalgamiento, E1, E2, E3, como de las fallas normales, A, B, C.

7.2.1 El cabalgamiento de Calamocha

El cabalgamiento aparece en un único plano de dirección prácticamente N-S y buzamiento de $37-45^\circ$ al oeste, de modo que cuarcitas ocreas paleozoicas se superponen sobre conglomerados, brechas y lutitas naranjas neógenos. Este plano lleva asociada una amplia zona de falla que incluye harinas y brechas, las cuales se asocian en planos de fallas menores paralelos al plano principal (Fig. 17).

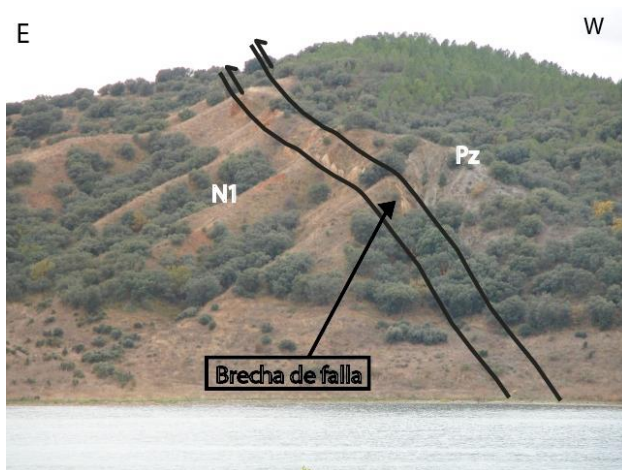


Figura 17. Traza principal del cabalgamiento en la ladera sur del embalse de Lechago. En esta imagen se aprecia la amplia zona de cizalla asociada al plano del cabalgamiento, que da lugar a brechas de falla.

Estas observaciones se reconocen a lo largo de las diferentes estaciones (Fig. 18), dando diferentes datos sobre el movimiento del mismo. En la estación E1 nos encontramos con una serie de planos que separan diferentes intensidades de brechificación. En concreto, de abajo a arriba (Fig. 18.B, C), nos encontramos con una zona de 1 m de espesor de brechas de cantos angulosos paleozoicos englobados en una matriz grisácea, por encima una zona de 40 cm de altura de harina de falla de color naranja y separada de la anterior por un plano de orientación 000, 44 W, por encima otra zona de unos 50 cm de brecha de falla de las mismas características, separada de la anterior por un plano de dirección 175, 37 W, y por encima una zona en la que se observan planos S-C bien desarrollados (Fig. 18D),. Se han medido y representado, tanto los planos que separan las diferentes zonas de falla como los planos S y C, siendo estos últimos paralelos a los planos de separación de las brechas. Mediante el análisis de las estructuras S-C (Fig. 18E), se ha obtenido un plano de movimiento con orientación 128, 71 N y una dirección de transporte hacia el SE.

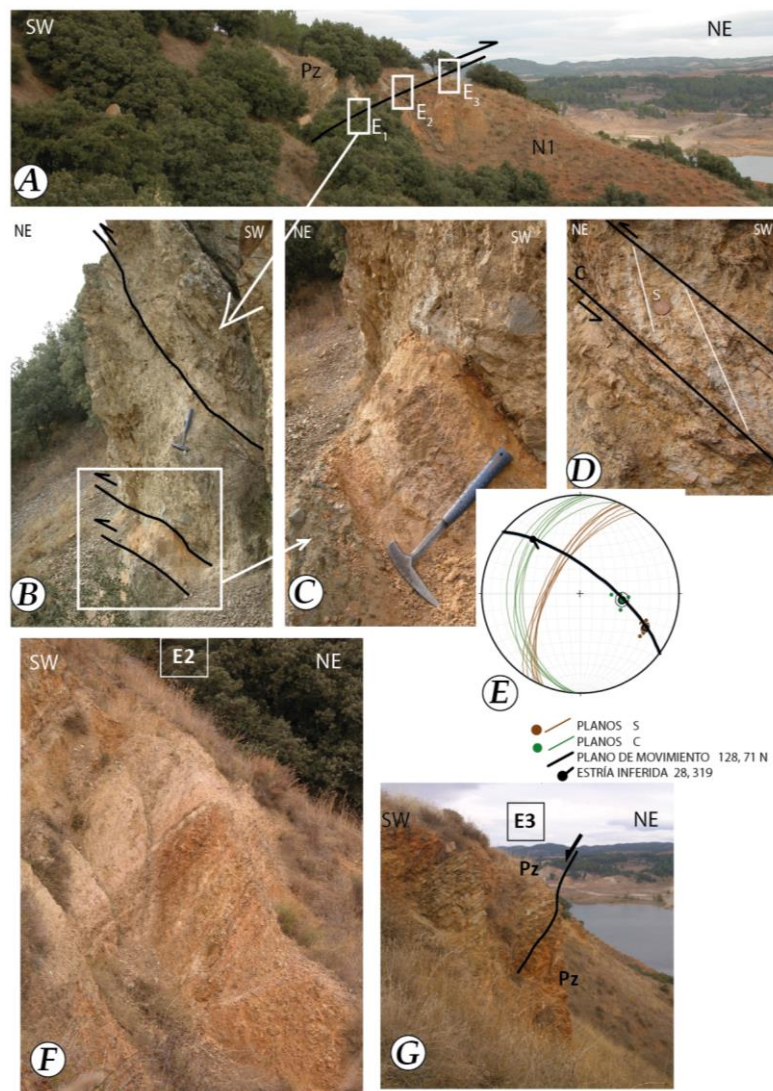


Figura 18. A. Panorámica del cabalgamiento en el que se han marcado las estaciones de medida. B, C D y E. Diferentes planos de la E1 así como la representación estereográfica de las estructuras S-C y la dirección de transporte establecida. F. Estación E2. G. Estación E3.

La estación E2 presenta una zona de harina de falla intercalada con planos de brechas de tamaño muy pequeño, formando planos de direcciones que siguen la línea de los planos anteriores, 010, 40 W (Fig. 18F). Dentro de esta zona de falla los cantos paleozoicos se encuentran reorientados formando una zona de cizalla con dirección principal 170,63 W. En la estación E3, en el bloque superior del cabalgamiento, encontramos una zona reactivada como falla normal en materiales paleozoicos, con un salto de falla de medio metro. En la zona de la falla existe un estrato de unos 40 cm de potencia de materiales blandos con cantos paleozoicos, que aparenta ser una zona de brechificación anterior. Por encima de esta falla normal, encontramos grietas de extensión. Los datos de estratificación son, por encima de la falla normal 015, 28 W, por debajo de la misma 172,16 W y el plano de falla presenta una orientación 018, 78 W.

Al otro lado del Embalse de Lechago se puede seguir el plano del cabalgamiento. El afloramiento se encuentra en el aliviadero del embalse (Fig. 19). En esta zona encontramos al cabalgamiento desdoblado en varios planos, entre los cuales se han reconocido una zona con intensa brechificación (Fig. 19B,D). Estos planos de cabalgamiento presentan una orientación prácticamente N-S, 002-010 y con buzamientos que varían entre los 50° y 70°. En alguno de los planos del cabalgamiento se han encontrado arcillas verdes formando una pátina sobre el plano. Al igual que en las zonas anteriores, la zona de falla aparece brechificada y deformada, pero en menor medida. En esta zona el cabalgamiento parece reactivado, ya que se reconocen una serie de fallas normales que desplazan la brecha asociada al plano de cabalgamiento. Estas fallas normales que se encuentran entre dos planos de cabalgamiento, presentan buzamientos cercanos a la vertical, 65-80°, y direcciones cercanas a las de los planos de cabalgamiento, entre 020-040. Además se ha reconocido una falla normal antitética (Fig. 19C,D), y una serie de fallas normales conjugadas de pequeñas dimensiones. La falla normal antitética tiene dirección E-W, 080, y buzamientos que se acercan mucho a la vertical, 70-80°.

7.2.2 Las fallas normales de Calamocha

En la figura 16 se han cartografiado tres trazas principales de falla normal, más o menos paralelas entre sí. En esa imagen también se han representado los diferentes afloramientos estudiados, los cuales corresponden con las imágenes tomadas en la figura 20. Se trata de trazas rectilíneas, de dirección NW-SE a NNW-SSE.

En la estación A se aprecia como las capas de las unidades neógenas, Rojo 2, Páramo 2 y Rojo 3 (N8, N9 y N10, respectivamente) que están en el bloque oeste hundido se acomodan a la falla normal generando un pliegue laxo (Fig. 20A, B). Se trata de planos netos y rectilíneos que no presentan zona de falla. Se han medido las capas en ambos flancos de

este pliegue (147, 33 W y 095, 15 S), y se ha inferido una línea charnela a partir de ellos con una dirección N173°E con ligera inmersión (15°) hacia el sur. La línea de charnela inferida tiene una orientación parecida a la traza cartográfica de las fallas.

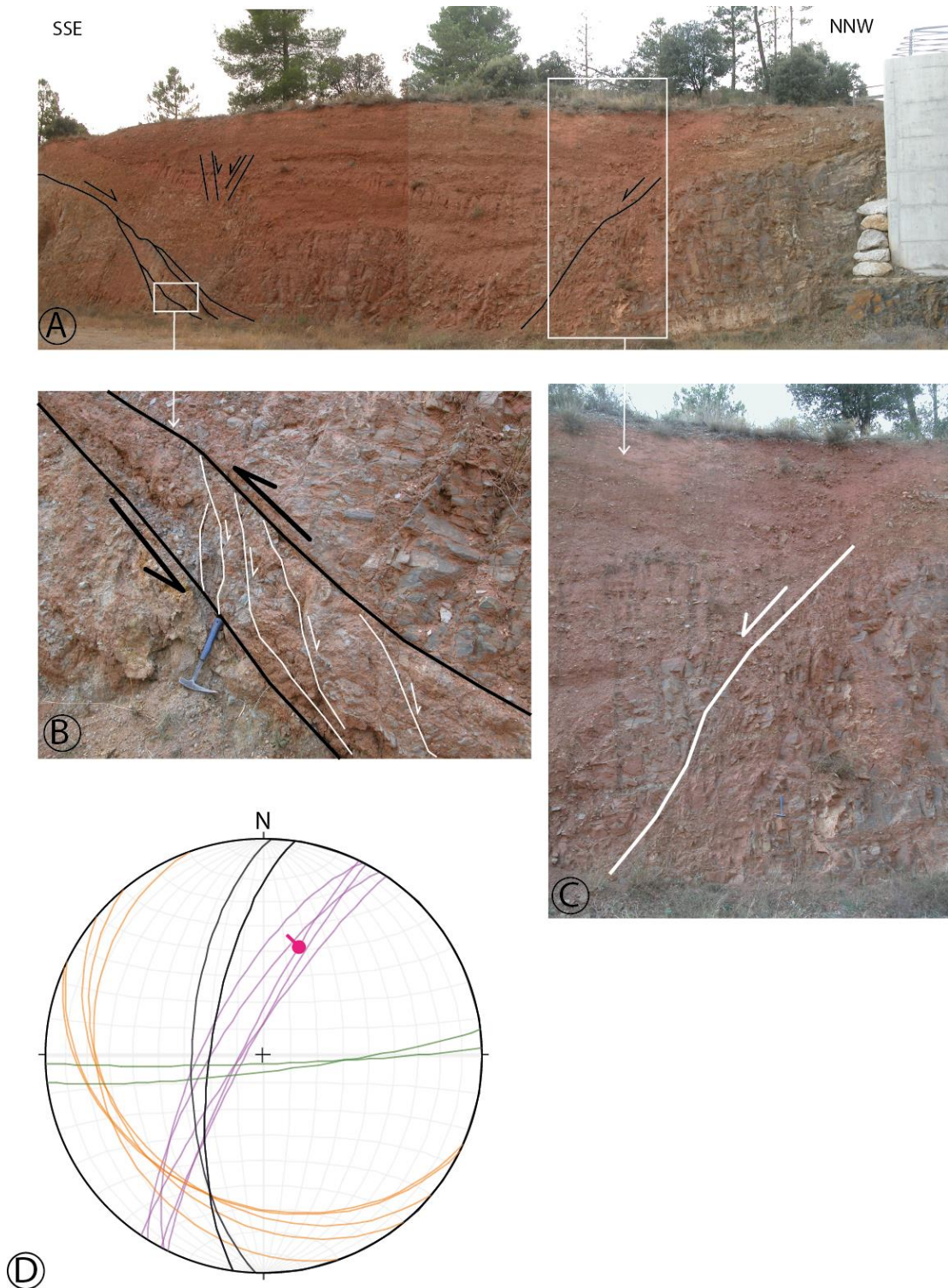


Figura 19. Afloramiento del Cabalgamiento en la zona del aliviadero del embalse de Lechago. **A.** Foto panorámica del afloramiento con fotos de detalle. **B.** Detalle de la zona del cabalgamiento con fallas normales. **C.** Detalle de la falla antitética. **D.** Representación estereográfica de las estructuras. En Naranja los datos de buzamiento de las capas paleozoicas. En morado los planos de falla normal, uno de ellos con estría. En negro, los planos de falla inversa y en verde los planos de falla antitética.

La falla principal de Calamocha tiene su continuación al oeste del río Jiloca (estación B) en donde ésta pone en contacto conglomerado, areniscas y arcillas naranjas neógenas del bloque hundido con una serie cuarcítica paleozoica.

Al noreste de la Venta de los céntimos (Fig. 16), la falla normal de Calamocha se desdobra en dos planos subparalelos, con un plano principal, al oeste, que pone en contacto los materiales neógenos más modernos (N10) con el paleozoico y la base del neógeno (unidad N1) y un plano menor, al este (estación C), que pone en contacto la unidad N1 con el paleozoico (Fig. 20C). Se han medido varios planos de fallas menores cuyas direcciones están en torno a 130 y buzamientos medios-altos que van de 57 a 85° hacia el W.

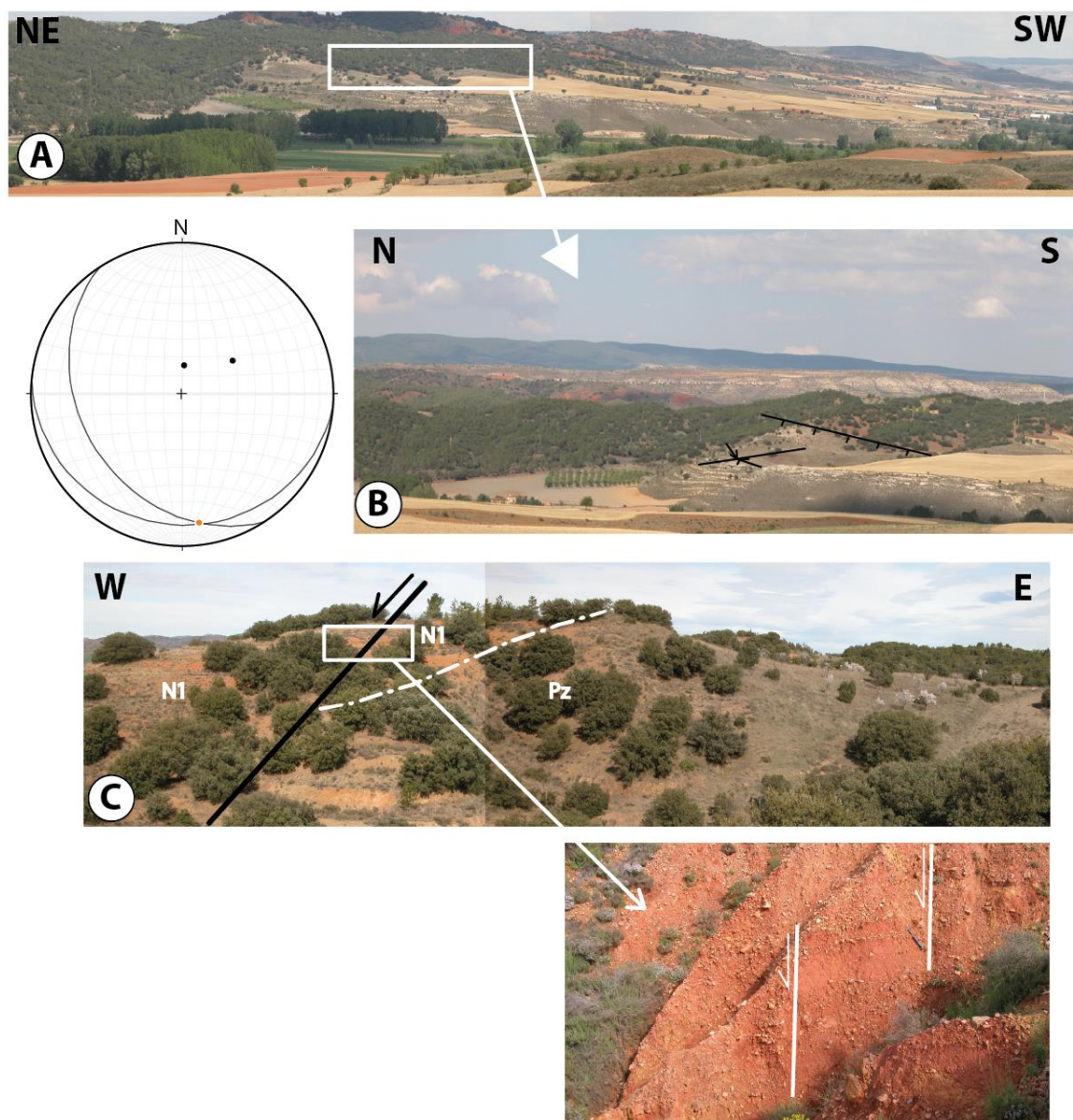


Figura 20. Fallas de Calamocha. **A.** Foto panorámica de la zona. **B.** Estación A. Traza de la falla con la traza del pliegue asociado y la representación estereográfica del mismo con su charnela inferida en naranja. **C.** Estación C, con foto de detalle de las fallas normales menores en materiales detríticos neógenos.

7.3. La falla normal de Luco del Jiloca

En Luco del Jiloca se ha cartografiado una falla normal, pero no se han podido tomar medidas por las condiciones del afloramiento. Es una falla que se aprecia muy bien en la foto aérea por las diferencias de color de los sedimentos neógenos, de colores anaranjados, con las cuarcitas y pizarras paleozoicas. Presenta una traza rectilínea con orientaciones muy similares al resto de las fallas normales de la zona.



Figura 21. Ortofoto de la zona de estudio en la que se ha marcado la traza de la falla de Luco del Jiloca.

7.4. La deformación del Paleozoico

A lo largo de la investigación se han reconocido diferentes estructuras de deformación en el Paleozoico las cuales no se han tenido muy en cuenta debido a que pueden pertenecer a cualquiera de las etapas de deformación sufridas por los materiales paleozoicos y no era el objetivo de este trabajo. El paleozoico en la zona de estudio en general se presenta con moderada deformación. Suele aparecer en los distintos afloramientos como una serie fundamentalmente cuarcítica que presenta frecuentemente direcciones NNW-SSE y suaves (25-35°) buzamientos al oeste. En algunos sectores se reconoce una serie más pizarrosa que tiene desarrollada una no muy marcada foliación de dirección E-W y suave buzamiento (30°) al sur (Fig. 5).

Un buen ejemplo de esta disposición general se reconoce en el afloramiento de materiales paleozoicos muy bien estratificados que aparece en un talud de la carretera Luco de Jiloca-Lechago (Fig. 22). En este afloramiento se reconocen además una serie de fallas normales e inversas que tienen direcciones NNW-SSE y buzamientos hacia el NE. De este afloramiento destacan, asimismo unas fallas normales conjugadas que aparecen basculadas junto con la estratificación

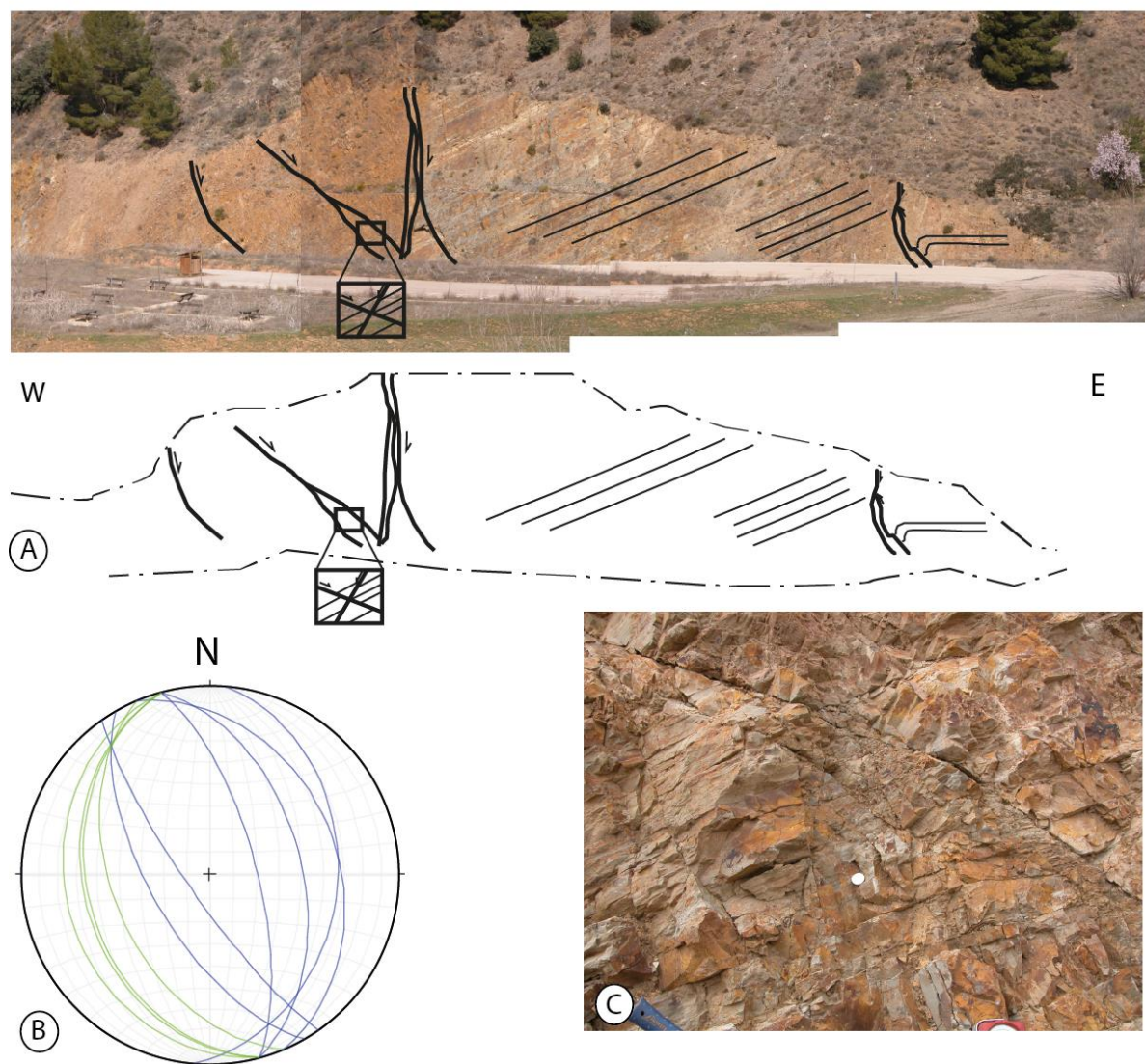


Figura 22. Afloramiento de los materiales paleozoicos en la carretera de Lechago. **A y B.** Fallas normales afectando al Paleozoico con su esquema y representación estereográfica de las mismas. En azul las fallas y en verde el buzamiento de las capas paleozoicas. **C.** Detalle de fallas normales conjugadas.

8. DISCUSIÓN

En el sector estudiado, que se sitúa en el margen oriental de la cuenca terciaria de Calatayud-Montalbán y que también comprende la cuenca neógeno-cuaternaria del Jiloca, las principales estructuras reconocidas son, por un lado, dos cabalgamientos de dirección NNW-SSE a N-S y buzamientos moderados ($<40^\circ$) hacia el oeste (cabalgamientos de Calamocha y Lechago). Por otro lado, fallas normales de escala kilométrica y saltos hectométricos que tienen similares direcciones pero mayores buzamientos ($60-70^\circ$) también hacia el oeste (fallas normales de Calamocha, Lechago y Luco de Jiloca). Los cabalgamientos superponen materiales paleozoicos sobre materiales conglomerático-lutíticos neógenos y las fallas normales cortan y desplazan las unidades neógenas más recientes (unidades N8 a N11). Estas observaciones sugieren que primero tuvo lugar una etapa tectónica compresiva a la que le sucedió una etapa tectónica extensional.

Nuestras observaciones sugieren que el cabalgamiento de Lechago, en el que se ha inferido una dirección de transporte al NE-ENE, fue fosilizado por la unidad neógena N3, es decir durante el Aragoniense inferior. Con respecto al cabalgamiento de Calamocha de similar orientación se ha inferido una dirección de transporte hacia el SE. Un aspecto a destacar es que los planos de cabalgamiento tienen aproximadamente la misma dirección y además muy similar a la orientación de las capas paleozoicas por lo que dichos planos han podido aprovechar niveles de despegue dentro de la propia serie paleozoica. Tenemos dos planos principales de cabalgamiento y una de las cuestiones es si nos encontramos en una secuencia de bloque superior o de bloque inferior. Dado que las unidades N2 a N7 pasan lateralmente a la unidad N1, que es la unidad afectada por el cabalgamiento de Calamocha, y que en este trabajo no se han podido seguir líneas de capa que nos permita hacer una correlación física entre los materiales afectados por dicho cabalgamiento y los que fosilizan el cabalgamiento de Lechago no tenemos argumentos sedimentarios a favor de ninguna de las teorías. Ahora bien, la unidad N4 está constituida por conglomerados que llegan a posiciones bastante centrales de la cuenca de Calatayud (Muelas de Lechago), lo cual puede ser interpretado como un incremento en la actividad tectónica compresiva en el margen de cuenca, quizás relacionada con la actividad en el cabalgamiento de Calamocha. Recordemos que la etapa compresiva debe mantenerse en el tiempo hasta, al menos, el depósito de la unidad N7, puesto que esta unidad sigue estando plegada en las Muelas de Lechago. Además, el cabalgamiento de Calamocha tiene asociada una amplia zona de trituración y deformación, con estructuras S-C, brechas y harinas de falla, que también podría sugerir que dicho cabalgamiento pudo estar activo durante un periodo mayor e incluso registrar distintas direcciones de transporte, que en última estancia serían las responsables del gran desarrollo, en algunos casos varios metros de espesor, de brechas y

harinas de falla. La existencia de diferentes direcciones de transporte ha sido ampliamente demostrada en cabalgamientos próximos como el cabalgamiento de Daroca (Colomer, 1987; Ansón, 2013) o el cabalgamiento de Utrillas (Simón y Liesa, 2011). En este sentido nuestras direcciones de transporte (NE y SE) también fueron inferidas por Ansón (2013) para el cabalgamiento de Daroca. Direcciones de transporte tan diferentes en planos de cabalgamiento de similar orientación deben de interpretarse como la sucesión de, al menos, dos direcciones de acortamiento distintas. Estas direcciones serían aproximadamente NE-SW y NW-SE si extrapolamos que hay una correlación directa entre dirección de transporte de los cabalgamientos y dirección de acortamiento, lo cual es relativamente frecuente (Simón y Liesa, 2011). En este sentido, una sucesión de acortamientos NE-SW y NW-SE, como aquí se sugiere a partir de las direcciones de transporte de cabalgamientos, ha sido propuesta para la Cordillera Ibérica a partir del análisis poblacional de fallas (Liesa, 2000; Liesa y Simón, 2009), de la superposición de plegamientos (Simón, 2004, 2005; Liesa, 2000) y de las deformaciones y direcciones de transporte en el cabalgamiento de Utrillas (Simón y Liesa, 2011).

Posteriormente a la tectónica compresiva en el Plioceno se superpone una tectónica extensional que da lugar al entramado complejo de fallas normales cartográficas de orientación NNW-SSE a NW-SE y con su bloque hundido al oeste. Estas fallas son las responsables de la formación de la fosa del Jiloca. Más que una única falla que controla el curso del río Jiloca, se trata de una sucesión de fallas NW-SE a NNW-SSE que se relevan de manera diestra según una dirección aproximada NNW-SSE a N-S. Estas fallas en la mayoría de los casos aprovechan la debilidad que suponen las zonas de cabalgamiento. De hecho las fallas normales de Lechago y Calamocha seguramente reactivan en profundidad los cabalgamientos de Lechago y Calamocha, respectivamente, ya que representan planos con similar dirección pero mayor buzamiento localizados en el bloque superior del cabalgamiento y en las proximidades de su actual traza cartográfica. También se han reconocido sobre los propios planos de cabalgamiento claros ejemplos de reactivación con movimiento normal. Se trata por tanto de un claro ejemplo de inversión negativa de las estructuras compresivas durante la etapa de extensión pliocena. Esta etapa extensional se corresponderá con la segunda de las etapas descritas por Simón (1983) para la fosa de Teruel, puesto que corta y desplaza el Paramo 2 (unidad N9), y es la responsable de la formación de la Fosa del Jiloca. Tras esta etapa que genera nuevos relieves, tiene lugar el desarrollo de sistemas de abanicos aluviales y glaciares procedentes tanto del margen activo como pasivo de la cuenca que se mezclan con los sistemas de terrazas generados por los ríos que surcan la zona durante el Cuaternario. Muchas de estas estructuras se ven cortadas por las fallas normales, con lo que se obtienen edades de actividad reciente de las

mismas. Esto ha sido confirmado por Martín-Bello (2012) para la Falla de Calamocha en la cercana localidad de Calamocha.

9. CONCLUSIONS

The geological mapping and structural study of the western margin of the Neogene Calatayud Basin has evidenced the succession of two main tectonic stages. At the first stage compressive structures with NNW-SSE trends generated during the lower Aragonian mainly two thrusts (Lechago and Calamocha thrusts) and a gentle syncline. Striae on fault planes or S-C structures within fault gouges and breccias allowed us to interpret thrust transport directions towards NE and SE. Several observations on affected materials by the thrusts and its discussion within the Iberian Chain evolution suggests the formation of thrusts and their emplacement towards the NE to ENE and then their reactivation with SE transport directions. That implies that the stress field changed along the time. Reactivations should be responsible for the development of thick breccias and gouges associated to main thrusts planes. After that compressive tectonic stage, an extensional one took place, generating normal faults with similar trends than thrusts but with deep dips towards the west. Normal faults extensively reactivated the compressional structures. Extensional tectonics that continues up to the present day raised new relief, generating alluvial fans sourced from fault scarp.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Álvaro, M.; Capote, R. y Vegas, R. (1979): Un modelo de evolución geotectónica para la Cadena Celtibérica. *Acta Geol. Hisp. Hom. L. Solé Sabarís*, 14: 172-177.
- Colomer i Busquets, M. (1987). Estudi Geològic de la vora sud-oest de la fossa de Calataiud-Daroca, entre Villafeliche i Calamocha. Tesis de Licenciatura, Univ. de Barcelona, 99 p.
- Hernandez, A., Olivé, A., Moissenet, E., Pardo, G., Villena, J., Portero, J.M., Gutiérrez, M., Aguilar, M.J., Leal, M.C. (1983): *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº. 491 (Calamocha) y memoria*. IGME, Madrid, 73 p..
- Liesa, C.L. (2000): *Fracturación y campos de esfuerzos compresivos alpinos en la Cordillera Ibérica y el NE peninsular*. Tesis doctoral, Univ. de Zaragoza, 760 p.
- Liesa, C.L., Simón, J.L., 2009. Evolution of intraplate stress fields under multiple remote compressions: The case of the Iberian Chain (NE Spain). *Tectonophysics* 474, 144-159.

- Martín-Bello L. (2013). Tectónica activa de la falla de Calamocha en la fosa del Jiloca. Trabajo Académicamente Dirigido, Universidad de Zaragoza. 37 p.
- Pérez García, A. (1989). Estratigrafía y sedimentología del terciario del borde meridional de la depresión del Ebro (sector riojano-aragonés) y cubetas de Muniesa y Montalbán. Tesis Doctoral, Univ. de Zaragoza, 525 p.
- Sanz-Rubio, E. (1999). *Análisis de los sistemas deposicionales carbonáticos y evaporíticos del Neógeno de la cuenca de Calatayud (provincia de Zaragoza)*. Tesis Doctoral. Univ. Complutense de Madrid, 130 p.
- Sanz-Rubio, E (2003) *Síntesis de la cronoestratigrafía y evolución sedimentaria de los sistemas lacustres evaporíticos y carbonatados neógenos de la cuenca de Calatayud-Montalbán. Estudios Geológicos*, 59: 83-105.
- Simón, J.L., 1983. Tectónica y neotectónica del sistema de fosas de Teruel. *Teruel* 69, 21-97.
- Simón, J.L. (2004): Superposed buckle folding in the eastern Iberian Chain, Spain. *Journal of Structural Geology*, 26: 1447-1464.
- Simón, J.L. (2005). Erosion-controlled geometry of buckle fold interference. *Geology*, 33: 561-564.
- Simón, J.L. y Liesa, C.L. (2011). Incremental slip history of a thrust: diverse transport directions and internal holding of the Utrillas thrust sheet (NE Iberian Chain, Spain). En: *Kinematic evolution and structural styles of fold-and-thrust belts* (J. Poblet y R.J. Lisle, Eds.). Geological Society Special Publ., 349: 77-97.